# 1. 作物生育期需水量之量測與推估技術

農業部農業試驗所作物組/侯雅玲/助理研究員

## 1.1 全臺大宗作物之分布與研究擇定

臺灣農業面臨水資源短缺與競用之挑戰，如何提高農業用水效率成為當務之急。為此，本計畫依據農業部農產品生產面積統計資料，選定全臺種植面積最廣的大宗作物，作為首要研究對象，作物涵蓋水稻、香蕉、番石榴等果品類、飼料/食用玉米、落花生、甘藷、大豆/毛豆等雜糧類，以及花椰菜與甘藍。旨在透過新突破觀測技術的引入，更準確地掌握作物蒸發散量，以滿足這些重點農作物的基本生長用水需求，從而提升水資源的供應與管理效率。

表一、臺灣民國 109 年大宗作物種植面積列表

| 類別 | 作物別 | 種植面積 (公頃) | 面積排序 |
|---|---|---|---|
| 稻作 | 水稻 | 261,784 | 1 |
| 果品 | 香蕉 | 16,417 | 3 |
| 果品 | 芒果 | 16,314 | 4 |
| 果品 | 番石榴 | 7,766 | 9 |
| 雜糧 | 落花生 | 19,652 | 2 |
| 雜糧 | 飼料玉米 | 16,312 | 5 |
| 雜糧 | 食用玉米 | 15,807 | 6 |
| 雜糧 | 甘藷 | 9,717 | 7 |
| 雜糧 | 大豆 | 3,543 | 11 |
| 花果菜類 | 毛豆 | 8,185 | 8 |
| 花果菜類 | 食用番茄 | 3,989 | 10 |
| 花果菜類 | 青花菜 | 1,627 | 12 |
| 花果菜類 | 花椰菜 | 1,574 | 13 |

## 1.2 作物蒸發散量量測技術之介紹

作物蒸發散量 (Crop evapotranspiration, ETc)，即所謂作物需水量 (Consumptive use of crops)，是灌溉管理和水資源規劃中極為關鍵的參數。將作物蒸發散量之概念應用至農業灌溉可追溯至 Jensen (1968) 的研究，其報告可視為現今農業灌溉所關注的作物需水量估算之原型，由於作物蒸發散量數據在實務上不易直接量測，Jensen 在最初報告中提出由兩個變因之乘積─作物係數 (Crop coefficient, Kc) 乘以潛在蒸發量 (Potential evaporation, Eo)─來估算作物蒸發散量，成為往後研究與應用之重要基礎。現今研究人員多著重於蒐集並分析當地多年期累積的氣象與作物蒸發散量之關係，以建立符合區域代表性之作物係數 (Kc)。透過在地化 Kc 的建立，不僅能提升 ETc 估算的可行性與精準度，也能使其擴大應用範圍，減少對耗時且高設備成本量測作物蒸發散量的依賴。

作物係數的建立，仰賴於對田間實際作物蒸散量的精準測量。ETc 的測量方法眾多，如蒸發皿法、滲漏計法、土壤水分收支法、鮑溫比值法 (Bowen ratio) 等微氣象法 (甘俊二，1996；申雍，2002)。在這些方法中，微氣象學中的渦流協變法 (Eddy covariance, EC) 是目前研究蒸散量最為精確的方法之一。大氣邊界層是大氣層中最接近地表的部分，因受到地表摩擦力、輻射熱力作用等因素影響，其內部會產生不同大小的渦流 (Eddies)。這些渦流運動加速了地表與大氣之間能量與物質的交換，例如熱量、水氣或污染物的輸送。EC 法係以渦流特性之理論基礎下，進行連續、直接地測量水氣通量，精確量化作物蒸發散量。

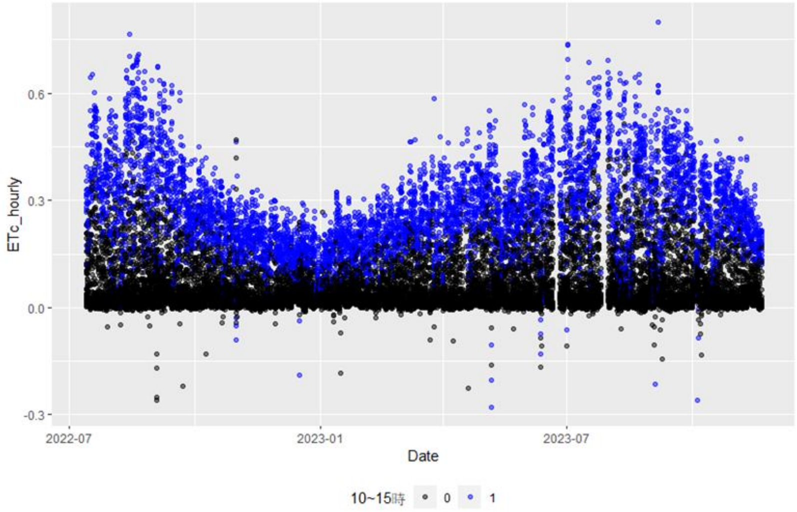
EC 法通過測量特定點的垂直傳輸速度和待測物理量波動之共變異數，來計算水氣 (vapor)、二氧化碳及熱能等垂直向上或向下之渦流通量。以蒸發散量為例，水氣通量即是垂直風速與水氣濃度兩種變數之間的同步變化 (式 1)，

$$F_{vapor} = \overline{w'q'\rho} \ldots \text{(式 1)}$$

更白話的說，量測在 0.1 秒 (極短的時間) 內在垂直方向的水氣濃度變化量，即是水氣增加或減少量，再將水氣通量 (質量) 除以水的密度即可轉換為以體積或水深為單位的蒸發散量 (ET, mm)。EC 系統需要有精密之儀器設備與資料運算處理能力相輔相承，包含三維超音波風速儀、

水氣、二氧化碳或甲烷紅外氣體分析儀 (圖一) 及溫度感測器，同步以取樣頻率為 10 Hz 以上高頻偵測風速與氣體濃度，方能捕捉不同渦流尺度下能量與物質的微小波動變化。EC 法之特點為能夠進行長期、連續且非破壞性的定點觀測通量 (圖二)，可應用於不同生態系統中之淨生態系統交換 (Net Ecosystem Exchange, NEE)、蒸發散量量測、溫室氣體排放監測、大尺度之水循環等研究領域。

圖一、三維超音波風速儀與開路式氣體分析儀。

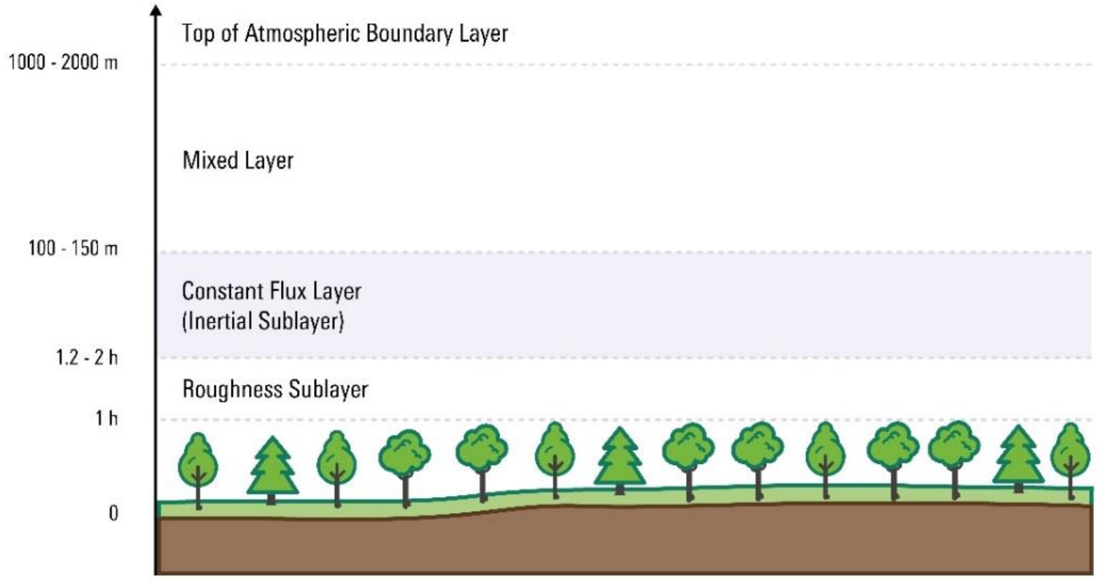



圖二、利用 EC 法進行長期、連續之定點蒸發散量觀測 (以番石榴作物為例)。

基於渦流 (Eddies) 之運動原理，通量量測場域設置需考量之相關因素包含：

1. 通量塔架設高度：

通量塔理想的設置高度是在常/恆量通量層 (Constant flux layer)，也稱作慣性子層 (Inertial sublayer) 中 (圖三)，其位於粗糙子層 (Roughness sublayer) 上方，受地面粗糙度影響相對較小，此區域的渦流垂直通量充分發展且穩定，大致保持不變。恆量通量層底部高度約為冠層高度之 1.66-2.16 倍 (Moureaux *et al.*, 2012)。以冠層高度為 0.5 m 為例，理想上量測儀器設置高度應設於土表 0.83-1.08 m 高，經驗上儀器設置高度應至少是冠層高度的 2 倍 (圖三)。當儀器高度設置太低，易受到粗糙子層的影響，且可能無法量測到小尺度的渦流通量，並造成量測範圍太小而不具有代表性。




圖三、大氣邊界層的結構與分層示意圖 (Burba, 2022)。h 為株高高度。

2. 通量足跡 (flux footprint) 範圍：

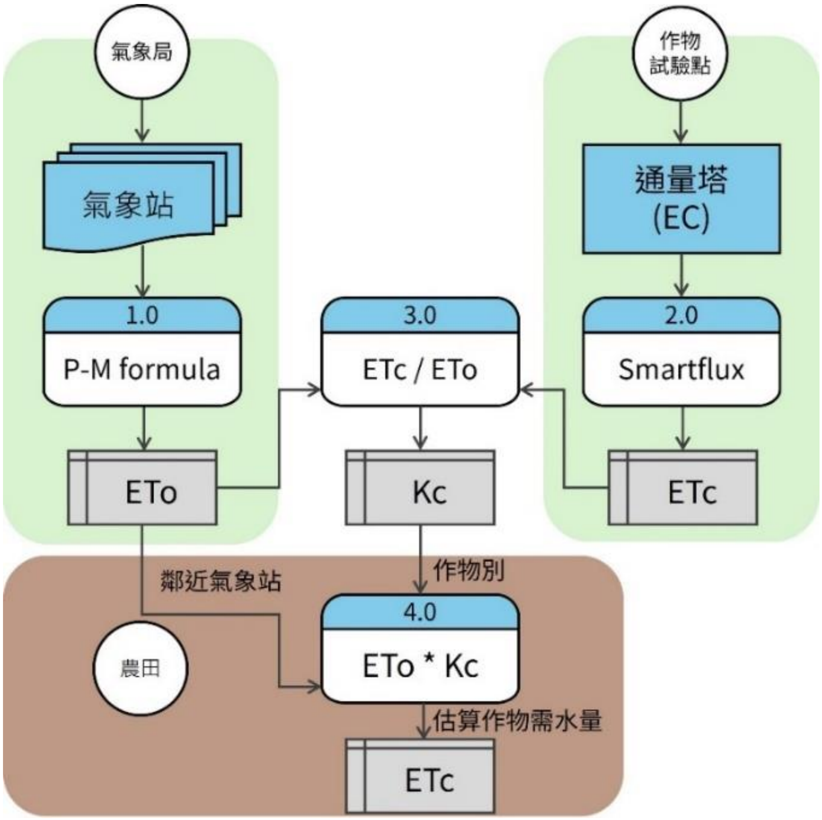
通量足跡概念可以理解為，通量塔所能偵測、捕捉到通量的空間範圍，足跡到儀器的直線距離稱為吹風距離 (fetch)。通量足跡受到量測高度、地表粗糙度、大氣穩定性之影響。當量測高度高、地表粗糙度低 (冠層高度低)、大氣穩定性高時，通量足跡範圍廣；反之，當量測高度降低、地表粗糙度提高及大氣穩定性降低時，通量足跡縮小，所偵測到的主要貢獻量 (占比高) 通量較靠近儀器周圍 (Burba, 2022)。正確規劃和設置通量塔，才能確保

測量到的通量確實代表目標區域的通量交換。EC 數據品質很大程度取決於環境條件，因此通量塔量測試驗場域大小有一定要求，需滿足觀測範圍到通量塔達一定足夠的吹風距離，使湍流氣團能夠充分發展 (Allen *et al.*, 2011)。

## 1.3 作物需水量估算方法

參考蒸發散量 (Reference evapotranspiration, ETo) 是依據「假定參考作物」表面的蒸發散量，由 Penman-Monteith 公式計算而來，藉此建立一個全球通用的氣象影響基準 (Allen *et al.*, 1998)。ETo 數值與作物無關，僅由經緯度、海拔、氣溫、風速和日照時數等氣象參數決定，是評估大氣環境對水分蒸發影響力的科學標準。

作物係數是評估作物耗水特性之指標，Kc 數值依不同作物項或作物不同生育階段的需水需求而異，可由實際作物蒸發散量 (ETc) 與參考蒸發散量 (ETo) 之比值來建立。作物係數建立後即可配合各地天氣數據 (ETo)，即可快速估算出作物需水量 (圖四)，而毋須每次都進行昂貴耗時的現場量測。




圖四、作物係數建立與作物需水量估算流程示意圖。1.0-4.0 分別代表不同數據處理流程。